ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY

УДК 519.688
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-37-46

Научная статья

EDN: UYBHDM

Оценка экологических рисков мелководного водоема при проведении дноуглубительных работ

А.Е. Чистяков, И.Ю. Кузнецова ✉
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ inna.yu.kuznetsova@gmail.com

Аннотация
Введение. Усиление антропогенного воздействия на водные объекты требует комплексных решений для оценки экологических рисков. В литературе описаны этапы оценки, возможности экологического менеджмента и экспертного анализа. Исследуется моделирование рисков в данной сфере. При этом не изучен потенциал прогнозирования рисков для состояния воды и биоразнообразия в ходе часто выполняемых гидротехнических работ, например дноуглубления. Очевидны актуальность и важное прикладное значение такого подхода. Цель исследования — описание математической модели и программного комплекса, которые позволят оценивать риски для видового разнообразия экосистемы мелководного водоема при проведении работ в акватории.
Материалы и методы. Исходной точкой моделирования было описание процесса движения водных масс по уравнениям Навье — Стокса и неразрывности при переменной плотности. Уравнение диффузии-конвекции использовали для прогнозирования переноса взвешенных и растворенных частиц и оценки влияния примесей при эвтрофикации. Создавая алгоритм, задействовали термины и определения, принятые Росстандартом для управления рисками в чрезвычайной ситуации.
Результаты исследования. Для тестирования решения взяли данные о гидромеханических работах в районе порта Архангельска. Визуализировали поля концентрации взвешенных частиц, через 0, 15, 30 и 45 минут после выгрузки грунта. Установлено, что в процессе оседания взвеси область ее распространения значительно расширяется, и это полностью согласуется с данными натурных экспериментов при проведении дноуглубительных работ. Рассчитали и свели в таблицу объемы загрязненной воды при отвалах грунта на трех участках (при однократном сбросе и в сумме). Для оценки рисков Азовского моря брали максимальные концентрации загрязняющего вещества (меди), полученные в ходе замеров, моделирования и дистанционного зондирования Земли. В тестах для определения потенциальной опасности вещества исходили из того, что его концентрация вызывает реакцию у 50 % организмов. Для рыб потенциально опасная концентрация — 4мг/л при длительности влияния 96 ч. Для зоопланктона — 50 мг/л и 48 ч. Для микроводорослей 20 мг/л и 72 ч. Получено значение нормализованного риска — $R_n \approx 0{,}52$. Признан значимым риск концентрации меди 80 мкг/л в водах Азовского моря. Выявлена тенденция увеличения солености Азовского моря и стратификация водных масс по содержанию кислорода, что согласуется с результатами экспедиционных исследований.
Обсуждение и заключение. Разработанный подход позволил оценить изменение качества вод Азовского моря и описать некоторые трансформации акватории. Речь идет, в частности, о распространении взвешенных частиц и о районах их оседания. Указанные процессы обусловливают изменение рельефа дна, которое, в свою очередь, может привести к сокращению видового состава водоема.

Ключевые слова: гидрохимические параметры акватории, прогноз распространения и осаждения взвешенных частиц, моделирование распространения загрязняющих веществ, сокращение видового разнообразия водной экосистемы

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21–71–20050.

Для цитирования. Чистяков А.Е., Кузнецова И.Ю. Оценка экологических рисков мелководного водоема при проведении дноуглубительных работ. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(2):37–46. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-37-46

Research Article

Assessment of Environmental Risks of a Shallow Water Body during Dredging Works

Alexander E. Chistyakov, Inna Yu. Kuznetsova ✉
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ inna.yu.kuznetsova@gmail.com

Abstract
Introduction. The increasing anthropogenic impact on water bodies necessitates integrated solutions to assess environmental risks. Literature describes the stages of risk assessment, the possibilities of environmental management, and expert analysis, while risk modeling in this field is being investigated. However, the potential for predicting risks to water quality and biodiversity during frequently performed hydraulic engineering works such as dredging has not been fully explored. The relevance and practical significance of such an approach are evident. This study aims to develop a mathematical model and software package that can assess risks to species diversity of the ecosystem of a shallow reservoir ecosystem during work in its water area.
Materials and Methods. The starting point for the simulation was a description of the movement of water masses based on the Navier-Stokes equations and the continuity equation at variable density. We used the diffusion-convection equation to predict the transfer of suspended and dissolved particles, as well as to assess the impact of impurities during eutrophication. To create the algorithm, we utilized the terms and definitions defined by the state standard for risk management in emergency situations.
Results. To test the solution, we took data on hydro-mechanical work in the port area of Arkhangelsk. We visualized the concentration fields of suspended particles 0, 15, 30 and 45 minutes after the soil was unloaded. It was found that during the settling of the suspension, the area of its distribution expanded significantly, and this was fully consistent with the data of field experiments during dredging. We calculated and tabulated the volumes of contaminated water at soil dumps in three sites (with a single discharge and in total). To assess the risks to the Sea of Azov, we used the maximum concentrations of pollutant (copper) obtained through measurements, modeling and remote sensing of the Earth. In tests to determine the potential danger of the substance, we assumed that its concentration caused a reaction in 50% of organisms. For fish, the potentially dangerous concentration was 4 mg/l with a duration of 96 hours of exposure. For zooplankton — 50 mg/l and 48 hours. For microalgae, 20 mg/l and 72 hours. The normalized risk value $R_n \approx 0.52$ was obtained. The risk of copper concentration of 80 µg/l in the waters of the Azov Sea was recognized as significant. A tendency towards increasing salinity and stratification of water masses in terms of oxygen content has been identified, consistent with the findings of expeditionary research.
Discussion and Conclusion. The developed approach has allowed us to assess the change in the quality of the waters of the Azov Sea and describe some transformations of the water area. Specifically, we are talking about the distribution of suspended particles and areas of their deposition. These processes can lead to changes in the bottom topography, which in turn can reduce the species diversity of the ecosystem.

Keywords: hydrochemical parameters of the water area, forecasting the spread and deposition of suspended particles, modeling the spread of pollutants, reducing the species diversity of the aquatic ecosystem

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

Funding Information. The research is done with the financial support from the Russian Science Foundation, scientific project No. 21–71–20050.

For Citation. Chistyakov AE, Kuznetsova IYu. Assessment of Environmental Risks of a Shallow Water Body during Dredging Works. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(2):37–46. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-37-46

Введение. Развитие экономики сопровождается масштабными работами на территории водных объектов. В качестве примеров можно привести строительство Золотого, Русского и Крымского мостов, дноуглубление с целью расширения акватории для судоходства, прокладку подводных газо- и нефтепроводов и многое другое.

Обязательная часть таких проектов — оценка потенциального воздействия на экологию, прогнозирование рисков. В России эти вопросы регулируются Требованиями к материалам оценки воздействия на окружающую среду[1]. Кроме того, действует ГОСТ Р ИСО 14001–2016. Это официальный перевод международного стандарта ISO 14001:2015, определяющего деятельность предприятия и его системы экологического менеджмента при формировании заявки и реализации проекта. Стоит отметить, что действующая редакция стандарта направлена в большей степени на предупреждение чрезвычайной ситуации, а не на ликвидацию ее последствий.

Авторы работы [1] выделяют три ступени оценки риска для окружающей среды, в [2] описаны пять этапов. Исследование [3] фокусируется на рисках нефтяных и газовых компаний. Здесь же рассматриваются позитивные аспекты внедрения системы экологического менеджмента.

Значительная часть материалов посвящена развитию систем корпоративного экологического менеджмента для обеспечения международной или национальной безопасности в сфере экологии [4]. В [5] изучена корреляция экологической ответственности компании и стоимости ее акций на фондовом рынке. Аналогичная проблематика рассматривается в [6]. Речь идет о том, что экологическая ответственность французской компании сказалась на росте ее рыночной стоимости. Оценивалось влияние на капитализацию премии «Грин компани эвордс» (Green Company Awards), которой отмечают лучшие с точки зрения экологии объекты и предприятия [7]. Во многих случаях учитывается экспертный подход к оценке экологических рисков компаний [8]. Однако, у него есть существенные недостатки, связанные с субъективностью выводов и сложностью обработки большого объема информации в условиях неопределенности [9]. Поэтому более предпочтительны математические методы оценки риска.

В [10] описываются популярные подходы к оценке рисков с акцентом на индексный. В работе [11] рассмотрена модель для оценки экологических рисков с использованием теории доказательств Демпстера — Шафера, которая хорошо себя зарекомендовала при решении задач в условиях неопределенности. Тем не менее ее практическое применение осложняется необходимостью многих сложных расчетов, в том числе комбинированных. В статье [12] описана математическая модель на основе вероятностного подхода и определения интегральной величины оценки риска. В литературе не рассматриваются возможности прогнозирования комплекса рисков для состояния воды и биоразнообразия при выполнении гидротехнических работ. Однако именно такой подход следует признать актуальным, имеющим очевидное прикладное значение на современном этапе развития экономики.

Цель представленного исследования — описание математической модели и программного комплекса, которые позволяют оценивать уязвимости и риски для гидрохимических параметров акватории и видового разнообразия экосистемы водоема при углублении дна мелководного водоема. В первую очередь речь идет о прогнозировании распространения и осаждения взвешенных частиц. Эти процессы существенно влияют на рельеф донной поверхности. Кроме того, моделируются зоны распространения загрязняющих веществ. Их токсичность может стать фактором сокращения видового разнообразия водной экосистемы.

Материалы и методы. Для прогнозирования результатов антропогенного влияния на экосистему водоема (например, при проведении дноуглубительных работ) предлагается комплексная математическая модель движения взвешенных частиц в водной среде. Она учитывает ветровые течения, движение водной среды и стоки рек, геометрию акватории, турбулентный обмен, переменную плотность водной среды, которая может зависеть от солености или взвеси. При моделировании предлагается для каждой фракции взвеси принимать во внимание скорость осаждения, определяемую размером и формой частиц. Решение можно дополнить моделью эвтрофикации водоема, позволяющей учитывать влияние биогенных веществ на процессы, протекающие в водоеме.

Постановка задачи

Модель движения вод. Для описания процесса движения водных масс в акватории задействуем модель гидродинамики [13]. Она включает в себя представленные ниже выражения.

1. Уравнения движения Навье — Стокса:

$$\begin{gathered}
\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu\frac{\partial u}{\partial z}\right),\\
\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu\frac{\partial v}{\partial z}\right),\\
\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial w}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial w}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu\frac{\partial w}{\partial z}\right)+g.
\end{gathered} \tag{1}$$

[1] *Об утверждении требований к материалам оценки воздействия на окружающую среду*. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: https://docs.cntd.ru/document/573339130 (дата обращения: 26.02.2024).

Здесь $V = \{u, v, w\}$ — вектор скорости движения водной среды [м/с]; P — давление [Па]; ρ — плотность [кг/м^3]; μ, ν — горизонтальная и вертикальная составляющие коэффициента турбулентного обмена [м^2/с]; g — ускорение силы тяжести [м/с^2].

2. Уравнение неразрывности в случае переменной плотности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0. \tag{2}$$

Начальные и граничные условия для системы уравнений (1) и (2) подробно описаны в [13].

Модель распространения взвешенных частиц. Для прогнозирования переноса взвешенных и растворенных частиц используем уравнение диффузии-конвекции [14]:

$$\frac{\partial c_r}{\partial t} + \frac{\partial (u c_r)}{\partial x} + \frac{\partial (v c_r)}{\partial y} + \frac{\partial \left((w + w_{s,r}) c_r \right)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial c_r}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial c_r}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu \frac{\partial c_r}{\partial z} \right) + F_r, \tag{3}$$

где c_r — концентрация r-й фракции взвеси [мг/л]; $w_{s,r}$ — скорость гравитационного осаждения r-й фракции взвеси [м/с]; F_r — функция интенсивности источников r-й фракции взвеси [мг/(л·с)].

Система уравнений (3) рассматривается при начальных и граничных условиях, подробно описанных в [14].

На основе системы (1)–(3) можно смоделировать процессы движения и осаждения взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ, а также рассмотреть возможность оптимизации площадей отвалов грунта. Модели целесообразно задействовать для сокращения вреда экосистеме водоема.

Модель эвтрофикации. Для оценки влияния примесей рассмотрим модель эвтрофикации вод на основе уравнения диффузии-конвекции [15]:

$$\frac{\partial S_r}{\partial t} + \frac{\partial (u S_r)}{\partial x} + \frac{\partial (v S_r)}{\partial y} + \frac{\partial \left((w + w_{s,r}) S_r \right)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial S_r}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial S_r}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu \frac{\partial S_r}{\partial z} \right) + F_r, \tag{4}$$

где S_r — концентрация r-й примеси [мг/л]; $w_{s,r}$ — скорость гравитационного осаждения r-й примеси [м/с]; F_r — функция, описывающая интенсивность химико-биологического источника r-й примеси [мг/(л·с)].

Система уравнений (4) рассматривается при начальных и граничных условиях, которые приводятся в [15].

Можно использовать (4), в частности, для описания:

– влияния примесей, поступающих в водоем в результате антропогенного воздействия, например при аварийной ситуации или сбросе сточных вод;

– процессов окисления и восстановления марганца;

– окисления сероводорода;

– расчета концентрации растворенного в воде кислорода.

Данные о размещении источников можно получить с помощью дистанционного зондирования Земли.

Алгоритм оценки риска при антропогенном воздействии. Известные подходы к пониманию риска систематизированы в [16]. В данной работе используется определение риска в соответствии с ГОСТ Р 55059–2012[2]. Риск — это вероятность наступления чрезвычайной ситуации или ожидаемый размер ущерба, связанный с реализацией неблагоприятного исхода. Рассмотрим пример, когда в воду поступают примеси, негативно влияющие на экосистему:

$$R = Ef_S \cdot E_S. \tag{5}$$

Здесь R — фактор риска; Ef_S — потенциальная опасность или токсичность примеси; E_S — фактор экспозиции или количество примеси в перерасчете на одну биологическую мишень. Для водоема фактор экспозиции можно рассчитать по формуле:

$$E_S = S \cdot P_S \cdot k_{BA}, \tag{6}$$

где S — заданная или рассчитанная на основе модели (4) концентрация примеси; P_S — индекс скорости гидролиза; k_{BA} — фактор биоаккумулирования[3] или накопления (например, тяжелых металлов) [17].

Для определения потенциальной опасности примеси или загрязняющего вещества Ef_S в мировой практике принято использовать набор стандартизированных тестов[4]. В странах Европейского Союза выделяют описанные ниже количественные оценки токсичности вещества.

---

[2] *ГОСТ Р 55059–2012. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Менеджмент риска чрезвычайной ситуации. Термины и определения.* Москва: Стандартинформ, 2018. 8 с.

[3] *Methods for Measuring the Toxicity and Bioaccumulation of Sediment-Associated Contaminants with Freshwater Invertebrates*. Second Edition. Washington: United States Environmental Protection Agency; 1994. 148 p.

[4] *Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment. Appendix R10-2 Recommendations for Nanomaterials Applicable to Chapter R.10 Characterisation of Dose [concentration] — Response for Environment*. European Chemicals Agency. URL: https://echa.europa.eu/guidance-documents/guidance-on-information-requirements-and-chemical-safety-assessment (дата обращения: 26.02.2024).

– *NOEC* — no observed effect concentration, максимальная недействующая концентрация вещества. Как правило, эта концентрация по сравнению с контрольной не вызывает статистически значимого негативного эффекта (вероятность его наступления не превышает 0,05) в течение заданного времени воздействия.

– *LOEC* — lowest observed effect concentration, наименьшая наблюдаемая эффективная концентрация. Ее действие вызывает ответную реакцию тестируемых организмов. Это могут быть нарушения обмена веществ, роста, развития, размножения и даже гибель. Значения *LOEC* выше значений *NOEC*. Если известен эффект (процент эффекта) *LOEC*, можно примерно определить *NOEC*: $NOEC = LOEC / 2$ (при $10\,\% < LOEC < 20\,\%$). То есть если *LOEC* оказывает влияние на 10–20 % исследуемой популяции, то значение *NOEC* можно примерно определить как половину от *LOEC*.

– *MATC* — maximal acceptable toxicant concentration, максимально допустимая концентрация токсичного вещества. Это расчетный параметр, определяемый как среднее геометрическое *NOEC* и *LOEC*;

– EC_x — effect concentration (можно перевести как «концентрация эффекта, при которой наблюдается *x* % эффекта по сравнению с контрольной группой»). То есть это концентрация вещества, при которой наблюдается ответная реакция у *x* % тестируемых организмов. Например, при концентрации EC_{50} реагируют 50 % организмов. Для расчета данного критерия часто используется статистический метод (например, регрессионный анализ). При этом необходимо использовать достаточное количество групп концентраций (доз), поскольку точность оценки зависит от числа и интервала концентраций, а не от размера выборки для каждой концентрации. Наряду с аббревиатурой EC_x используют LC_x или $L(E)C_x$.

В рамках данного исследования рассматривались три набора тестов[5], применимые к природным водным объектам.

Результаты исследования. На основании рассмотренных моделей и подходов к оценке риска сформировали описанный ниже алгоритм из пяти шагов.

Шаг 1. Изучение характеристик акватории (географических, климатических, гидрологических). На данном шаге также рассматриваются потенциальные источники поступления взвеси и примесей. Это могут быть работы по расширению и очистке акватории, стоки рек, промышленные сбросы, судоходство и т.д. Следует определить возможный объем взвеси.

Шаг 2. Моделирование сценариев распространения взвесей и примесей на основе уравнений (1)–(4).

Шаг 3. Оценка токсического эффекта Ef_S по трем выбранным тестам.

Шаг 4. Оценка фактора риска для каждого вещества на основе (5)–(6) и расчет нормализованного фактора риска $R_n \in [0, 1]$. Для нормализации используется формула $(S - S_{\min})/(S_{\max} - S_{\min})$, где $S_{\min}$ и $S_{\max}$ — минимальная и максимальная концентрации рассматриваемого вещества.

Шаг 5. Формулирование предварительных выводов. Будем считать риск высоким при $R_n \geq 0{,}55$, значимым при $0{,}3 \leq R_n \leq 0{,}55$ и отсутствующим при $R_n < 0{,}3$.

Шаги 2–4 могут повторяться, если нужно определить оптимальный вариант проведения работ. Например, при дноуглублении можно моделировать распространение взвешенных веществ для различных точек сброса грунта и оценивать вред, причиняемый экосистеме.

Для численной реализации моделей (1)–(4) и описанного выше алгоритма оценки риска при антропогенном воздействии разработан программный комплекс на языке C++. Он объединяет четыре программных модуля. Ниже описано назначение каждого из них.

1. Расчет трехмерного вектора скорости движения водной среды на основе системы уравнений (1)–(2). Принимается во внимание сложная геометрия расчетной области.

2. Расчет на основе системы уравнений (3) переноса взвешенных частиц и их оседания. В данном случае имеется в виду многокомпонентная взвесь.

3. Моделирование эвтрофикации водоема на основе системы уравнений (4). Учитываются фито-, зоопланктон, а также 13 химических элементов и их соединений, которые существенно влияют на гидробиологические процессы водоема. Это растворенный кислород, железо, сера, сероводород, сульфаты, сульфиты, азот, аммонийный азот, нитриты, нитраты, фосфаты, силикаты, кремнекислота.

4. Оценка рисков антропогенного воздействия на основе описанного выше алгоритма.

Моделирование процессов движения и оседания взвеси при дампинге грунта. Разработанный программный комплекс моделирует процессы заиления судоходных каналов Дона. К тому же он позволяет изучать транспорт взвешенных частиц и переформатирование донной поверхности Азовского моря. Особое внимание уделяется прибрежной зоне и устьевым районам. Кроме того, софт использовался для оценки экологического состояния акваторий при проведении дноуглубительных работ в Белом море, в районе Двинской губы.

[5] *Soil and Sediment Risk Assessment of Organic Chemicals*. Technical Report No. 92. Brussels: European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals; 2004. 145 p.

В качестве примера рассмотрим моделирование процессов движения и осаждения взвеси при проведении работ по расширению акватории [18]. С этой целью задействуем данные по работам в районе порта Архангельска. Для моделирования распространения и осаждения взвешенных частиц в качестве исследуемой области водоема взяли участок длиной 3 км вдоль направления течения. Его ширина — 1,4 км; глубина — 10 м.

Физические параметры водной среды и взвеси:

– скорость течения — 0,2 м/с;

– плотность взвешенного материала — 1600 кг/м^3;

– скорость осаждения взвеси — 2,042 мм/с;

– содержание частиц диаметром менее 0,05 мм в грунте — 26,83%;

– объем выгружаемого насыпного материала — 741 м^3.

Параметры расчетной области:

– шаг по горизонтальным пространственным координатам — 20 м;

– шаг по высоте — 1 м;

– расчетный интервал — 2 часа;

– шаг по времени — 1 минута.

На рис. 1 представлены поля концентрации взвешенных частиц (в мг/л), соответствующие разным интервалам времени. Трехмерный срез показывает сечение расчетной области плоскостью, которая проходит через точку выгрузки и образуется векторами, направленными вертикально и вдоль течения (течение — слева на право).

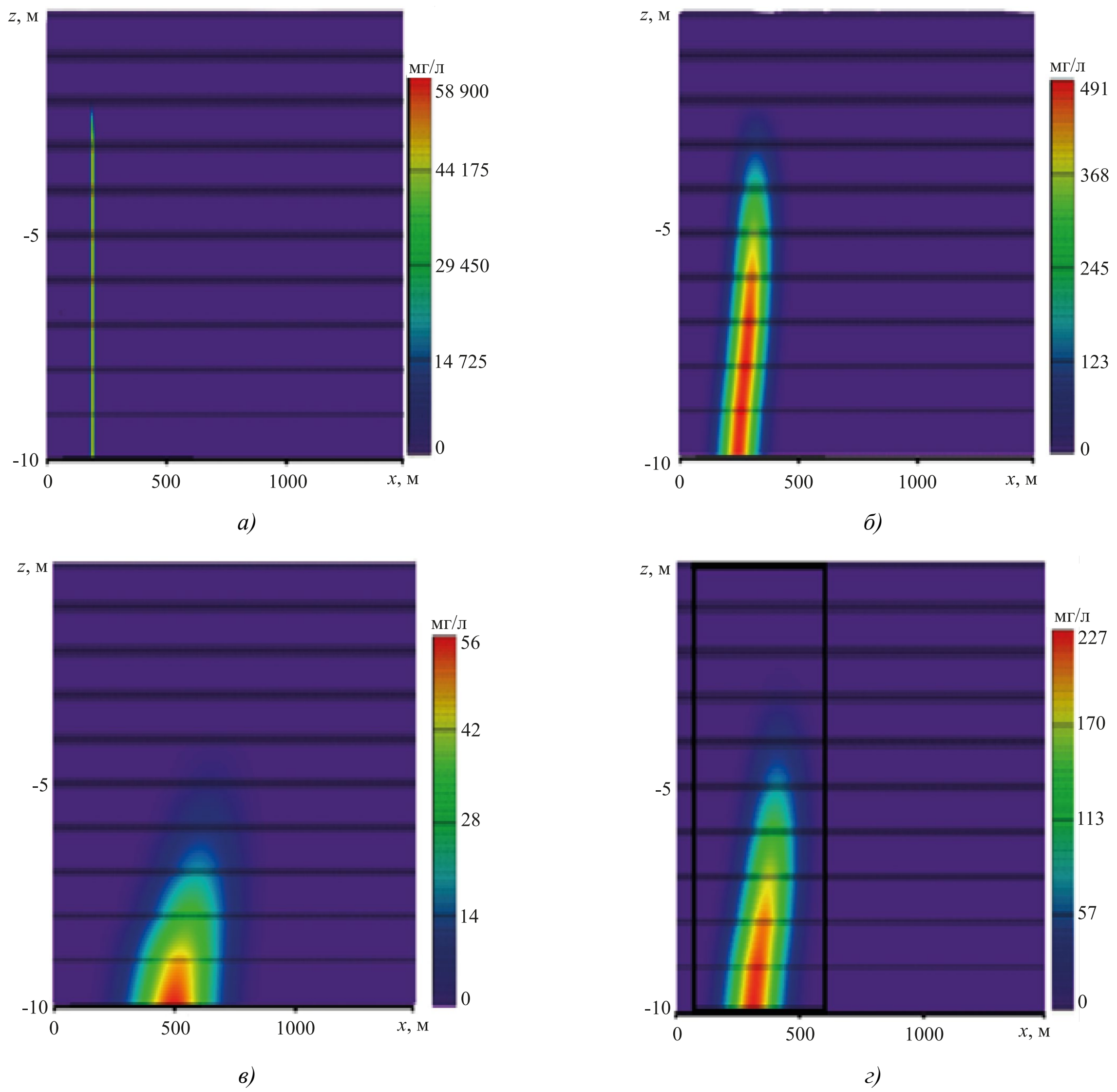


Рис. 1. Поля концентрации взвешенных частиц (в срезе «глубина — ширина» водоема) в разные интервалы времени с момента выгрузки грунта: *а* — $T = 0$; *б* — $T = 15$ мин; *в* — $T = 30$ мин; *г* — T =45 мин. Цветная легенда показывает концентрацию взвеси. На горизонтальной оси — данные о ширине водоема, на вертикальной — о глубине

На основе полученных результатов рассчитали объем загрязненной воды при отвалах грунта на трех участках сброса (таблица 1).

Таблица 1

Объемы загрязненной воды при сбросе грунта на трех участках, млн м^3

Участок	Объем загрязненной воды при одном сбросе с учетом концентрации взвеси в воде			Объем сбросов	Общий объем загрязненной воды			
					с учетом концентрации взвеси в воде			Всего
	от 0,25 до 20 мг/л	от 20 до 100 мг/л	более 100 мг/л		от 0,25 до 20 мг/л	от 20 до 100 мг/л	более 100 мг/л	
1	0,89	0,245	0,15	124	110,36	30,38	18,6	159,34
2	0,813	0,202	0,105	50	40,65	10,1	5,25	56
3	0,889	0,24	0,15	45	40,01	10,8	6,75	57,56

Из таблицы видно, что при сбросе грунта высокая концентрация взвеси фиксируется в относительно малом объеме воды (это, допустим, часть воды, которая перемешана с грунтом). Большее количество воды имеет более низкую концентрацию (как, например, вода в непосредственной близости от сброшенного грунта). Значительные объемы воды загрязняются с меньшей концентрацией взвеси в процессе сброса грунта, его осаждения и переноса течением.

Участки сброса грунта и количество сбросов определялись по техническому заданию для работ по углублению акватории порта. Выявлены области водоема, в которых возможна гибель фито- и зоопланктона. Рассчитаны площади этих областей.

Оценка экологического состояния акватории Азовского моря. Экологическое состояние мелководного водоема оценивалось на примере Азовского моря. При исследовании использовали два подхода. Первый предполагает анализ баз постоянно пополняющихся данных. Это результаты экспедиционных изысканий авторов данной статьи в Азово-Черноморском бассейне. Второй связан с применением программного комплекса, который моделирует гидродинамику и гидробиологию водоема, а также процессы транспорта взвешенных частиц. По результатам сравнения полученных оценок проводились калибровка и верификация математических моделей для более точных оценок рисков.

Программный комплекс дает возможность оценить риски таких явлений, как:

– превышение предельно допустимых концентраций опасных загрязняющих веществ;

– бурный рост в процессе эвтрофикации вредоносных и токсичных водорослей («цветение» вод).

Таким образом, задействовав новый софт, можно сократить затраты на экспедиции, которые организуются для отбора проб воды.

Отметим также, что для контроля экологического состояния изучаемого водного объекта использовались данные дистанционного зондирования Земли.

Приведем пример обработки данных замеров, полученных в экспедиции. Рассмотрим процесс поступления меди от предприятий металлургической промышленности со стоком реки Дон в Азовское море. Медь — это тяжелый металл. Она может накапливаться в организме до опасных показателей.

При оценке рисков мелководного водоема (Азовского моря) использовались максимальные значения концентрации загрязняющего вещества, полученные в ходе замеров, математического моделирования и данных дистанционного зондирования Земли. В фиксированной точке водоема или исследуемой области выбирали конкретное измеренное или рассчитанное значение концентрации загрязняющего вещества. Предположим, что замеры выявили фактическую концентрацию взвеси в воде 80 мкг/л. В зависимости от участка и глубины забора проб концентрация меди в водах Азовского моря колеблется от 0,001 мкг/л до 100 мкг/л.

Индекс скорости гидролиза для меди примем равным $P_S = 1{,}5$, а фактор биоаккумулирования (накопления вещества) — $k_{BA} = 2$. Тогда согласно (6) фактор экспозиции $E_S = 240$ мкг/л.

Как отмечалось выше, для определения потенциальной опасности вещества Ef_S рассматриваются три теста:

– LC_{50} в течение 96 часов для рыб (судак) — 4 мг/л;

– LC_{50} в течение 48 часов для зоопланктона (дафнии) — 50 мг/л;

– LC_{50} в течение 72 часов для ингибирования роста микроводорослей — 20 мг/л.

Примем во внимание (5) и описанный выше алгоритм. Получим значение нормализованного риска $R_n \approx 0{,}52$. Таким образом, риск наличия меди в концентрации 80 мкг/л в водах Азовского моря можно охарактеризовать как потенциально значимый.

Также стоит отметить, что модель (1)–(4) позволила отследить тенденцию увеличения солености Азовского моря и стратификацию водных масс по содержанию кислорода. Это согласуется с результатами проведенных ранее экспедиционных исследований [19].

Остановимся отдельно на реализации 4-го шага алгоритма, то есть на оценке фактора риска для каждого загрязняющего вещества. Используя систему (5)–(6), расчет нормализованного фактора риска $R_n \in [0,1]$ и разработанный программный комплекс, вычислили максимальные значения концентраций основных загрязняющих веществ, характерных для Азовского моря.

Завершающий анализ рисков проводили по итогам обработки экспедиционных данных и результатов математического моделирования. Судя по индексу загрязненности воды, экологическое состояние Азовского моря улучшается. Ранее вода определялась как «значительно загрязненная», теперь как «умеренно загрязненная» [19].

Обсуждение и заключение. Предложенное софтверное решение дает возможность прогнозировать результаты антропогенного влияния на динамику качества вод Азовского моря. Разработанный программный комплекс позволяет моделировать распространение в акватории взвешенных частиц, определять основные районы их оседания. Такие процессы меняют рельеф дна. Следствием может быть существенное сокращение видового состава в районе оседания взвеси. Согласно полученным результатам, уменьшение площади отвала грунта при проведении дноуглубительных работ способно ограничить вред, причиняемый экосистеме водоема. Ориентируясь на полученные таким образом данные, можно в целом судить о потенциальных негативных последствиях, связанных с экономическим ущербом и рисками для здоровья людей.

Список литературы / References

1. Скворцова И.В., Смирнова И.С., Злобина З.А. Экологические риски в разрезе концепции устойчивого развития. *Скиф*. 2020;4(44):651–655.

Skvortsova IV, Smirnova IS, Zlobina ZA. Environmental Risks in the Concept of Sustainable Development. *Skif*. 2020;4(44):651–655. (In Russ.).

2. Okeukwu EK, Okeke OC, Irefin MO, Ezeala HI, Amadi CC. Environmental Impact Assessment and Environmental Risk Assessment: Review of Concepts, Steps and Significance. *IIARD International Journal of Geography and Environmental Management*. 2023;9(2):25–51. https://doi.org/10.56201/ijgem.v9.no2.2023.pg25.51

3. Сергеева И.Г., Схаб Н.А. Идентификация и оценка экологических рисков компаний нефтегазового сервиса. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент»*. 2020;4(43):3–10. https://doi.org/10.17586/2310-1172-2020-13-4-3-10

Sergeeva IG, Skhab NA. Identification and Assessment of Environmental Risks for Oil and Gas Service Companies. *Scientific journal NRU ITMO. Series "Economics and Environmental Management"*. 2020;4(43):3–10. https://doi.org/10.17586/2310-1172-2020-13-4-3-10 (In Russ.).

4. Ionescu GH, Firoiu D, Pirvu R, Vilag RD. The Impact of ESG Factors on Market Value of Companies from Travel and Tourism Industry. *Technological and Economic Development of Economy*. 2019;25(5):820–849. https://doi.org/10.3846/tede.2019.10294

5. Li Cai, Chaohua He. Corporate Environmental Responsibility and Equity Prices. *Journal of Business Ethics*. 2014;125:617–635. https://doi.org/10.1007/s10551-013-1935-4

6. Ikram Radhouane, Mehdi Nekhili, Haithem Nagati, Gilles Paché. The Impact of Corporate Environmental Reporting on Customer-Related Performance and Market Value. *Management Decision*. 2018;56(7):1630–1659. https://doi.org/10.1108/MD-03-2017-0272

7. Lyon T, Yao Lu, Xinzheng Shi, Qie Yin. How Do Investors Respond to Green Company Awards in China? *Ecological Economics*. 2013;94:1–8. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.06.020

8. Yemelin PV, Kudryavtsev SS, Yemelina NK. The Methodological Approach to Environmental Risk Assessment from Man-Made Emergencies at Chemically Hazardous Sites. *Environmental Engineering Research*. 2021;26(4):200386. https://doi.org/10.4491/eer.2020.386

9. Ermakov S, Volkova L, Kapustina I. Ecosystems Measurement: Risk Assessment Methods and Ecological Safety Principles. *Transportation Research Procedia*. 2021;54:47–57. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.046

10. Yunna Han. Research on Mathematical Model of Environmental Assessment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;450:012035. https://doi.org/10.1088/1755-1315/450/1/012035

11. Hatefi SM, Basiri ME, Tamošaitienė J. An Evidential Model for Environmental Risk Assessment in Projects Using Dempster–Shafer Theory of Evidence. *Sustainability*. 2019;11(22):6329. https://doi.org/10.3390/su11226329

12. Сухорукова И.В., Чистякова Н.А. Математическая модель анализа факторов экологического риска. *Вестник университета*. 2023;(7):81–89. https://doi.org/10.26425/1816-4277-2023-7-81-89

Sukhorukova IV, Chistyakova NA. Mathematical Model for the Analysis of Environmental Risk Factors. *Vestnik Universiteta.* 2023;(7):81–89. https://doi.org/10.26425/1816-4277-2023-7-81-89 (In Russ.).

13. Alekseenko E, Roux B, Sukhinov A, Kotarba R, Fougere D. Coastal Hydrodynamics in a Windy Lagoon. *Computers and Fluids*. 2013;77:24–35. https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.02.003

14. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Атаян А.М., Кузнецова И.Ю., Литвинов В.Н., Никитина А.В. Математическая модель процесса осаждения на дно многокомпонентной взвеси и изменения состава донных материалов. *Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета*. 2022;60:73–89. https://doi.org/10.35634/2226-3594-2022-60-05

Sukhinov AI, Chistyakov AE, Atayan AM, Kuznetsov IYu, Litvinov VN, Nikitina AV. Mathematical Model of Process of Sedimentation of Multicomponent Suspension on the Bottom and Changes in the Composition of Bottom Materials. *Izvestiya Instituta Matematiki i Informatiki Udmurtskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2022;60:73–89. https://doi.org/10.35634/2226-3594-2022-60-05 (In Russ.).

15. Никитина А.В., Сухинов А.И., Угольницкий Г.А., Усов А.Б., Чистяков А.Е., Пучкин М.В. и др. Оптимальное управление устойчивым развитием при биологической реабилитации Азовского моря. *Математическое моделирование.* 2016;28(7):96–106.

Nikitina AV, Sukhinov AI, Ugol'nitskii GA, Usov AB, Chistyakov AE, Puchkin MV, et al. Optimal Control of Sustainable Development in Biological Rehabilitation of the Azov Sea. *Matematicheskoe Modelirovanie.* 2016;28(7):96–106. (In Russ.).

16. Свиязова Т.Г. Управление рисками в системе менеджмента качества: экономическое содержание и классификация рисков. *Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика*. 2017;6:143–167.

Sviyazova TG. Risk Management in Quality Management System: Economic Content and Classification of Risks. *Moscow University Economic Bulletin.* 2017;6:143–167. (In Russ.).

17. Miletić A, Lučić M, Onjia A. Exposure Factors in Health Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in Soil and Sediment. *Metals*. 2023;13(7):1266. https://doi.org/10.3390/met13071266

18. Ковтун И.И., Проценко Е.А., Сухинов А.И., Чистяков А.Е. Расчет воздействия на водные биоресурсы дноуглубительных работ в Белом море. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016;9(2):27–38.

Kovtun II, Protsenko EA, Sukhinov AI, Chistyakov AE. Calculating the Impact on Aquatic Resources Dredging in the White Sea. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2016;9(2):27–38. (In Russ.).

19. Сухинов А.И., Тишкин В.Ф., Иванов К.А., Лапин Д.В., Чистяков А.Е. *Опыт моделирования гидрофизических процессов в Азовском море*. В: Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности. Москва: Изд-во МГУ; 2012. С. 156–164.

Sukhinov AI, Tishkin VF, Ivanov KA, Lapin DV, Chistyakov AE. Experience in Modeling Hydrophysical Processes in the Azov Sea. In: *Supercomputing Technologies in Science, Education and Industry.* Moscow: Publishing house of Moscow State University; 2012. P. 156–164. (In Russ.).

Об авторах:

Александр Евгеньевич Чистяков, доктор физико-математических наук, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 1135-8843, ORCID, ResearcherID, ScopusID, cheese_05@mail.ru

Инна Юрьевна Кузнецова, старший преподаватель кафедры математики и информатики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 8806-8134, ORCID, ResearcherID, ScopusID, inna.yu.kuznetsova@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

А.Е. Чистяков — описание теоретической части исследования, разработка программных модулей для расчета процессов гидродинамики и гидробиологии.

И.Ю. Кузнецова — разработка программных модулей для расчета процессов движения и оседания взвешенных частиц и оценки параметра риска антропогенного влияния, оформление научной статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 13.03.2024
Поступила после рецензирования 02.04.2024
Принята к публикации 16.04.2024

About the Authors:

Alexander E. Chistyakov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Computer Software and Automated Systems Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-код: 1135-8843, ORCID, ResearcherID, ScopusID, cheese_05@mail.ru

Inna Yu. Kuznetsova, Senior Lecturer of the Mathematics and Informatics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-код: 8806-8134, ResearcherID, ScopusID, ORCID, inna.yu.kuznetsova@gmail.com

Claimed Contributorship:

AE Chistyakov: description of the theoretical part of the study, development of software modules for calculating processes of hydrodynamics and hydrobiology.

IYu Kuznetsova: development of software modules for calculating the processes of movement and sedimentation of suspended particles and assessing the risk parameter of anthropogenic influence; design of the scientific paper.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 13.03.2024
Revised 02.04.2024
Accepted 16.04.2024